

УДК 538.951

**А. С. Лазаренко** – кандидат фізико-математичних наук,  
доцент кафедри фізики та методики викладання фізики  
Бердянського державного педагогічного університету

## Вплив стиків зерен полікристалів на зернограничне внутрішнє тертя

*Роботу виконано на кафедрі фізики та методики  
викладання фізики БДПУ*

В статті вивчено механізм зернограничного затухання у полікристалах. З'ясовано, що явище зернограничного внутрішнього тертя у значній мірі обумовлено взаємозгодженням зернограничних процесів у потрійних стиках зерен полікристалів. Побудовано відповідну теоретичну модель, згідно з результатами якої зернограничне затухання обернено пропорційне характерному розміру зерна полікристалу.

**Ключові слова:** внутрішнє тертя, границі зерен, потрійні стики, дислокація орієнтаційної невідповідності.

### Лазаренко А. С. Влияние стыков зёрен поликристаллов на зернограничное внутреннее трение.

В статье изучается механизм зернограничного затухания в поликристаллах. Выяснено, что явление зернограничного внутреннего трения в значительной степени обуславливается взаимным согласованием зернограничных процессов в тройных стыках зёрен поликристалла. Построена соответствующая теоретическая модель, в соответствии с результатами которой зернограничное затухание обратно пропорционально характерному размеру зерна поликристалла.

**Ключевые слова:** внутреннее трение, границы зёрен, тройные стыки, дислокация ориентационного несоответствия.

### Lazarenko A. S. The Influence of Grains Junctions in Polycrystals in Grain Boundaries Internal Friction.

The article deals with the model of grain boundary damping in polycrystals. The grain boundary internal friction is caused by agreement grain boundaries processes in the junctions of the grains. A theoretical model of grain boundary damping is built. Grain boundary damping is inversely upon the size of grains of polycrystals.

**Key words:** internal friction, grain boundaries, triple junctions, dislocation of the orientation inconsistency.

**Постановка наукової проблеми та її значення.** Внутрішнім тертям (ВТ) у твердих тілах називаємо явище необоротного перетворення механічної енергії процесів деформування цих тіл у теплову енергію. Кількісно величину внутрішнього тертя у твердотільних зразках визначають за затуханням, або відносним розсіюванням енергії пружної деформації за один період коливань.

Внутрішнє тертя залежить від багатьох фізичних і структурних факторів, вплив яких визначено характером їхньої участі у тому або іншому механізмі розсіювання енергії. Кожний з таких механізмів і, разом з ним, відповідний фізичний або структурний фактор, за умови незмінності зовнішніх термодинамічних умов, виявляє себе у певному діапазоні частот. На кривій залежності затухання від частоти в цих діапазонах спостерігаємо так звані максимуми внутрішнього тертя. Внутрішнє тертя залежить також від температури та амплітуди деформаційних коливань.

Одним із найважливіших для сучасної техніки і технологій різновидом твердих тіл є полікристали. Від інших твердих тіл вони відрізняються тим, що складаються з величезної кількості монокристалів (кристалічних зерен), кристалографічні осі яких орієнтовані довільно. Внаслідок цього сусідні кристалічні зерна полікристалів розділено тонким шаром, атомна структура якого неупорядкована порівняно з ідеальною будовою кристалічної решітки. Такі специфічні дефекти будови полікристалів називаються границями зерен (ГЗ), вони суттєво впливають на всі фізико-механічні характеристики полікристалів. Внутрішнє тертя у полікристалах характеризується утворенням додаткового максимуму частотної залежності декременту затухання. Цей максимум називають зернограничним і з ним пов'язують специфічний різновид розсіювання енергії пружних коливань в полікристалах – зернограничне внутрішнє тертя (ЗГВТ).

**Аналіз останніх досліджень із цієї проблеми.** Явище ЗГВТ відкрито понад п'ятдесят років тому і описано на феноменологічному рівні в класичному дослідженні Ке [9]. Незважаючи на великий проміжок часу і результативні експериментальні дослідження, які проводилися у цьому напрямку, досі не створено теоретичну модель, яка пояснювала б усі результати експериментального вивчення [10]. Більшість існуючих моделей пояснює явище ЗГВТ, розглядаючи процеси утворення і

взаємодії дефектів у ГЗ полікристалів [1–4]. У таких моделях ГЗ розглянуто як виділену частину полікристалу. Проте у реальному полікристалі ГЗ перетинаються між собою, утворюючи канали потрійних стиків (ПС) зерен полікристалу. Нехтувати впливом ПС, у яких відбувається взаємоузгодження всіх зернограничних процесів [2], можна лише у випадку великих розмірів зерен. Експериментальне порівняння фізико-механічних властивостей об'ємних і «паркетних» полікристалів, в яких є ПС, з відповідними властивостями «бамбукових» полікристалів, в яких ПС відсутні, виявило їхню якісну розбіжність [5]. Ця якісна відмінність виявилася в практичному зникненні зернограничного максимуму ВТ при переході від «паркетного» полікристала до «бамбукового». Такий результат свідчить про те, що ПС ГЗ полікристалів є провідними у процесах ЗГВТ, особливо у випадку дрібнозернистих полікристалів.

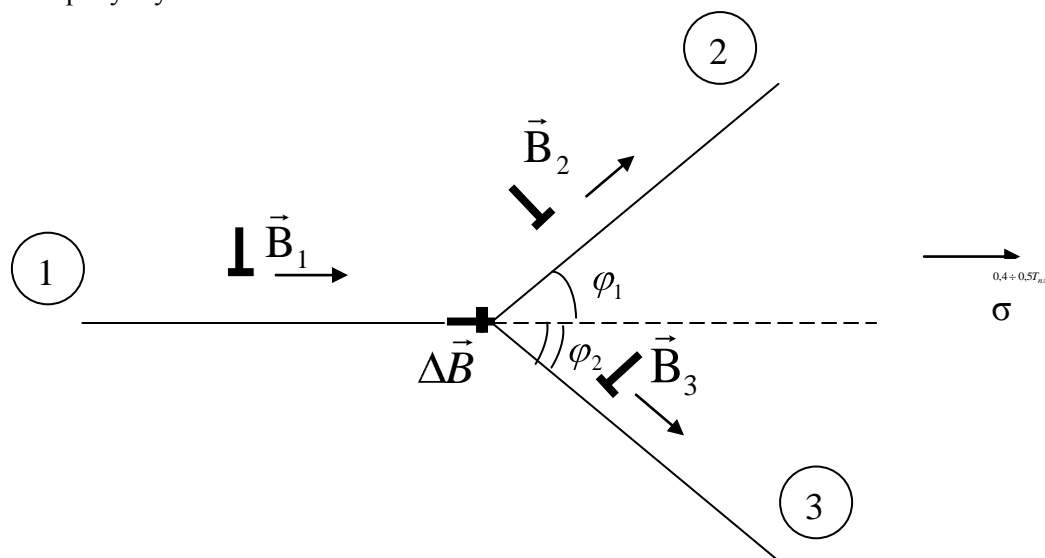
**Мета статті** – створити теоретичну модель впливу ПС ГЗ полікристала на процеси ЗГВТ.

Основні **завдання** статті – теоретична розробка механізму розсіювання енергії пружної деформації у стиках зерен і визначення аналітичної залежності зернограничного затухання від розмірів зерна полікристалу.

**Виклад основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів дослідження.** Розглянемо модель виникнення зернограничного максимуму ВТ, яка базується на таких експериментальних фактах: енергія активації процесів, які відповідають за зернограничний максимум ВТ, є подібною до енергії активації зернограничної дифузії; перехід від полікристалічної структури з ПС зерен до «бамбукової» структури без ПС призводить до практичного зникнення зернограничного максимуму [5].

Нехай на полікристалічний зразок, в якому присутні ПС ГЗ, діє періодично змінне зовнішнє механічне навантаження. Амплітудне значення навантаження є достатнім для активації міжзеренного просковзування за рахунок консервативного руху зернограничних дислокацій (ЗГД). При цьому просковзування може супроводжуватися переповзанням зернограничних дислокацій, яке контролюється зернограничною дифузією. Останнє припущення достатньо обґрунтоване, оскільки навіть при значеннях температури  $0,4 \div 0,5T_{пл}$ , де  $T_{пл}$  – температура плавлення, дифузія вздовж границь зерен (зерногранична дифузія) буде значною [6].

Періодична зміна знаку зовнішнього механічного навантаження зумовлює періодичну зміну напрямку міжзеренного просковзування, або напрямку консервативного руху зернограничних дислокацій. Для моделей ЗГВТ, які не враховують наявності потрійних стиків зерен, зміна напрямку руху ЗГД не впливатиме на механізм розсіювання енергії пружної деформації. Із врахуванням ПС ситуація кардинально змінюється, оскільки ЗГД змушені проходити через стик з однієї ГЗ в інші. Такий перехід буде можливим лише за рахунок дислокаційної реакції в ПС. Схематично ця реакція зображена на рисунку 1.



**Рис. 1.** Реакція проходження зернограничної дислокації через потрійний стик зерен полікристалу

На рисунку 1  $\varphi_1$  – кут між площиною ГЗ з номером 2 і напрямком зовнішнього механічного навантаження;  $\varphi_2$  – кут між площиною ГЗ з номером 3 і напрямком зовнішнього механічного навантаження;  $\sigma$  – зовнішнє механічне навантаження;  $\vec{B}_1$  – це вектор Бюргерса ЗГД, яка рухається вздовж ГЗ з номером 1 до стику ГЗ з номерами 1, 2, 3;  $\vec{B}_2$ ,  $\vec{B}_3$  – вектори Бюргерса ЗГД, які утворюються в ГЗ з номерами 2 і 3 після проходження зернограничного зсуву через ПС;  $\Delta\vec{B}$  – вектор Бюргерса дислокації орієнтаційної невідповідності (ДОН), що залишилася в стику зерен у результаті дислокаційної реакції:

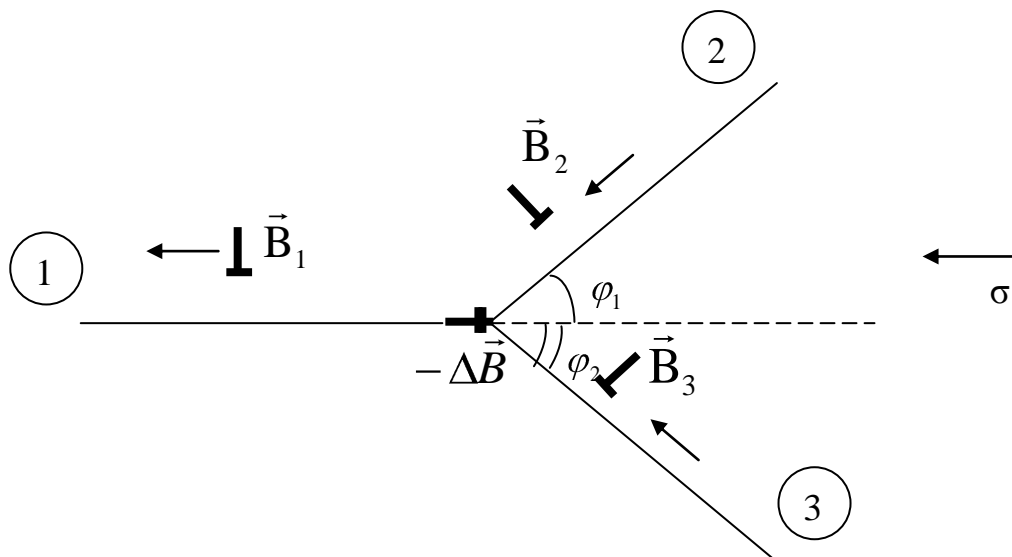
$$\Delta\vec{B} = \vec{B}_1 - \vec{B}_2 + \vec{B}_3. \quad (1)$$

ДОН у каналі стику зерен виконує роль концентратора напружень дислокаційного типу і, за умови накопичення достатньої величини модуль вектора Бюргерса може загальмувати зернограничне просковзування вздовж ГЗ з номером 1. Оскільки стиковий концентратор напружень виникає внаслідок дії зовнішнього механічного навантаження, то енергія полів цього концентратора – це частина енергії пружної деформації полікристалічного зразка. Внаслідок підвищеної дифузійної проникності вздовж каналів ПС, відразу ж після формування дислокаційного концентратора напружень, в стику зерен розпочинається його релаксація внаслідок дифузійного переносу речовини. Під час релаксації концентратора напружень ДОН «розчиняється», а енергія поля концентратора напружень розсіюється, переходячи в теплову енергію.

Отже, якщо дислокації з векторами Бюргерса  $\vec{B}_2$  і  $\vec{B}_3$  після зміни напрямку зовнішнього навантаження повертаються до стику, ДОН вже повністю, або частково розчиняється.

Це унеможливує дислокаційну реакцію, зворотню до реакції (1) з утворенням в ГЗ з номером 1 дислокації з вектором Бюргерса  $\vec{B}_1$ , внаслідок зникнення дислокацій з векторами Бюргерса  $\vec{B}_2$ ,  $\vec{B}_3$  і стикової дислокації орієнтаційної невідповідності. Натомість, ЗГД з векторами Бюргерса  $\vec{B}_2$  і  $\vec{B}_3$  проходять через стик у ГЗ з номером 1, утворюючи в ній дислокацію з вектором Бюргерса  $\vec{B}_1$ . В стику знову лишається ДОН з тим же за модулем, але протилежним за напрямом вектором Бюргерса (рис. 2). Цю дислокаційну реакцію записуємо рівнянням:

$$-\Delta\vec{B} = \vec{B}_2 + \vec{B}_3 - \vec{B}_1. \quad (2)$$



**Рис. 2.** Зворотнє проходження зернограничних дислокацій через стик зерен після зміни напрямку зовнішнього механічного навантаження

Подальший процес розсіювання відповідної частки енергії пружної деформації здійснюється за описаною схемою. Після чергової зміни напрямку зовнішнього механічного навантаження цикл повторюється.

Отже, за період коливань у ГЗ, що утворюють ПС, накопичується енергія пружної деформації, яка дорівнює енергії ЗГД, необхідної для здійснення зернограничного зсуву і розсіюється енергія, яка дорівнює енергії двох дислокацій орієнтаційної невідповідності з модулем вектора Бюргерса

$$\Delta B = |\vec{B}_1 - \vec{B}_2 + \vec{B}_3|. \quad (3)$$

Цей висновок дає можливість оцінити значення зернограничного затування, обумовленого стилями ГЗ. Затування визначаємо як відносну міру розсіювання енергії, або як обернену величину до добротності системи, що здійснює коливання:

$$Q^{-1} = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta W}{W}, \quad (4)$$

де  $\Delta W$  – енергія, що розсіюється за період коливань;  $W$  – енергія, що накопичується у коливальній системі, і забезпечує періодичність коливань за рахунок переходів з одного виду енергії в інший.

Враховуючи те, що більшість ГЗ полікристалу – це ГЗ загального типу, вважаємо, що:

$$|\vec{B}_1| = |\vec{B}_2| = |\vec{B}_3| = B. \quad (5)$$

Також стверджуємо, що кути між площинами ГЗ, які утворюють потрійний стик, близькі до рівноважних значень за умовою Херрінга. Тоді,

$$\varphi_1 + \varphi_2 = \frac{2\pi}{3}. \quad (6)$$

Враховуючи залежності (5) і (6) з виразу (1), отримуємо:

$$\Delta B \approx B \left( 1 - \cos \varphi_1 + \sqrt{3} \sin \varphi_1 \right)^{1/2}. \quad (7)$$

Для оцінки зернограничного затування з формули (4), використаємо формулу для енергії крайової дислокації в континуальному наближенні:

$$W = \frac{GB^2}{4\pi(1-\nu)} \ln \left( \frac{r_1}{r_0} \right), \quad (8)$$

де  $G$  – модуль зсуву,  $\nu$  – коефіцієнт Пуассона,  $r_1$  – радіус обрізання пружних полів дислокації,  $r_0$  – радіус ядра дислокації, за значенням близький до модуля її вектора Бюргерса.

Приймаючи за радіус обрізання полів ЗГД характерний розмір зерна полікристалу  $d$ , а для ДОН – радіус каналу ПС  $R$ , отримуємо з (4) і (8):

$$Q^{-1} = \frac{1}{2\pi} \frac{\ln(\Delta B/B)}{\ln(R/B)}. \quad (9)$$

У лінійному наближенні, яке відповідає випадку дрібнозернистого полікристалу:

$$Q^{-1} = \frac{RB}{2\pi\Delta B} d^{-1}. \quad (10)$$

Рівняння (10) свідчить, що зернограничне затування, обумовлене потрійними стилями ГЗ, обернено пропорційне до значення характерного розміру зерна полікристала, що відповідає експериментальним результатам [7, 25–32; 2].

**Висновки і перспективи подальших досліджень.** Таким чином, у праці з'ясовано, що механізми ЗГВТ у полікристалах тісно пов'язані з процесами проходження міжзеренних зсувів через потрійні стилю зерен. Цей зв'язок активно простежуємо у дрібнозеренних полікристалах. Експериментальні дані відповідають результатам теоретичного моделювання, яке пов'язує розсіювання енергії пружної деформації з дифузійним розчиненням стикової дислокації орієнтаційної невідповідності.

Подальші дослідження прогнозують розвиток і удосконалення теоретичної моделі, для чого необхідно: врахувати атомну структуру ГЗ і ПС у дислокаційних реакціях; розглянути вплив супутніх механізмів релаксації стикового концентратора напружень за рахунок локальної пластичної

деформації білястикових областей кристалічних зерен; теоретично вивчити частотну і амплітудну залежність зернограничного затухання.

*Список використаної літератури*

1. Внутреннее трение в металлах и сплавах / О. А. Белоус и др. – М. : Наука, 1966. – 438 с.
2. Грязнов М. Ю. Внутреннее трение в микрокристаллических металлах. Ч. 1 : Экспериментальные исследования микрокристаллических меди никеля / Ю. М. Грязнов, А. Н. Сысоев, В. Н. Чувильдеев // Материаловедение. – 1999. – № 6. – С. 46–51.
3. Грязнов М. Ю. Внутреннее трение в микрокристаллических металлах. Ч. 2 : Модель зернограничного внутреннего трения / Ю. М. Грязнов, А. Н. Сысоев, В. Н. Чувильдеев // Материаловедение. – 1999. – № 7. – С. 33–37.
4. Грязнов М. Ю. Внутреннее трение в микрокристаллических металлах. Ч. 3 : Модель дислокационного внутреннего трения / Ю. М. Грязнов, А. Н. Сысоев, В. Н. Чувильдеев // Материаловедение. – 1999. – № 8. – С. 22–26.
5. Рабухин В. Б. Влияние поверхности раздела на пластическую деформацию и внутреннее трение металлических нитей / В. Б. Рабухин // Поверхность. Физика, химия, механика. – 1983. – № 10. – С. 2–21.
6. Рабухин В. Б. О повышенной диффузионной проницаемости границ в области их тройных стыков / В. Б. Рабухин // Поверхность. Физика, химия, механика. – 1986. – № 6. – С. 143–145.
7. Рабухин В. Б. Роль тройных стыков границ в зернограничной неупругости / В. Б. Рабухин // ФММ. – 1983. – Т. 55, № 1. – С. 178–183.
8. Фёдоров Ю. А. К теории зернограничного фона внутреннего трения / Ю. А. Фёдоров, О. И. Сысоев // ФММ. – 1976. – Т. 41, № 6. – С. 1152–1158.
9. Ke T. S. Experimental evidence of the viscous behavior of grain boundaries in metals / T. S. Ke // Phys. Rev. – 1947. – V. 71, 8. – P. 533–546.
10. Ke T.S. Micro-mechanism of grain boundary relaxation in metals / T. S. Ke // Scripta Metall. – 1990. – Vol. 24. – P. 347–352.

Статтю подано до редколегії  
03.08.2011 р.